

作物水分胁迫指数与土壤含水量关系探讨*

赵晨 罗毅 袁国富 于强

(信阳师范学院生物系 信阳 464000) (中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘要 基于冠层温度的作物水分胁迫指标 *CWSI* (Crop Water Stress Index) 广泛用于指导作物灌水时间, 利用自动气象站的观测资料分别计算了不同供水处理条件下冬小麦中午 12:00 的作物水分胁迫指数, 并将作物水分胁迫指数和对应的土壤含水量进行相关分析, 以探讨用作物水分胁迫指数确定灌水量的可行性。结果表明, 二者呈一定相关性, 但相关关系不密切, 复相关系数为 0.54, 作物水分胁迫指数随土壤含水量的降低呈明显的增大趋势; 作物水分胁迫指数随气象因子的波动表现出明显的波动性, 且在作物遭受较严重水分胁迫下波动性更强, 这预示着利用作物水分胁迫指数直接定量标识作物土壤水分状况的可靠性不强。

关键词 作物水分胁迫指数 灌溉 冬小麦 冠层温度

Primary investigation on the relationship between the crop water stress index and the soil moisture. ZHAO Cheng (Teachers College of Xinyang, Henan Province, Xinyang 464000), LUO Yi, YUAN Guo-Fu, YU Qiang (Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101), *CJEA*, 2001, 9(1):34~36

Abstract Crop water stress index (*CWSI*) is widely used in determinating irrigation time but seldom in determinating irrigation water amount. The objective of this paper is to investigate the relationship between the *CWSI* and the soil moisture and the possibility of using it to determinate the irrigation water amount. Analysis of the *CWSI* of the different irrigation treatment plots indicated that *CWSI* increased with the decrease of soil water content and showed variations caused by fluctuation of the weather factors. The correlation coefficient of *CWSI* to soil moisture content was only 0.54. This indicates that *CWSI* may not be used reliably for determinating the irrigation amount.

Key words Crop water stress index, Irrigation, Wheat, Canopy temperature

确定合理的灌水时间和灌水量是灌水管理最重要的措施, 利用作物水分胁迫诊断指标指导灌溉是灌水管理关键技术之一。基于冠层温度的作物水分胁迫指标得到广泛的研究, 1981年 Idso S. B.^[1]提出了作物水分胁迫指数 *CWSI* (Crop Water Stress Index), Jackson R. D. 等^[2]基于冠层能量平衡理论对 Idso S. B. 的公式进行推导并给出了理论形式, 之后二者被分别称为作物水分胁迫指数的经验公式和理论公式。从大量的研究结果看, 使用作物水分胁迫指数指导作物适时灌溉十分有效, 但作物水分胁迫指数并不能定量指示作物根系的土壤水分状况。本研究根据 1999 年中国科学院禹城综合试验站实测的小气候和土壤水分资料, 模拟计算了不同灌水处理试验条件下不同土壤水分状况对应的作物水分胁迫指数, 建立作物水分胁迫指数与土壤有效水分含量的关系, 探讨利用作物水分胁迫指数直接标识灌水时间和灌水量的可行性。

1 理论方法

Idso S. B. 给出了 1 个基于冠层温度的作物水分胁迫指数表达式^[1]:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_{cl} - T_a)}{(T_{cu} - T_a) - (T_{cl} - T_a)} \quad (1)$$

式中, $T_c - T_a$ 为冠层温度-气温差, T_c 为冠层温度, T_a 为冠层上方空气温度; $T_{cl} - T_a$ 为冠层温度-气温差下限, 是作物充分供水时的冠层温度-气温差; $T_{cu} - T_a$ 为冠层温度-气温差上限, 是作物遭受严重水分胁迫、蒸腾为 0 时的温差。Idso S. B. 建议根据试验数据建立 $T_{cl} - T_a$ 与空气饱和水汽压差 (*VPD*) 的线性经验关系, 这样通过较容易测得的空气饱和水汽压差来确定冠层温度-气温差下限, 实际应用中颇为方便。Jackson R. D.

* “九五”中国科学院重大项目 (KZ951-A1-301) 与特别支持项目 (KZ95T-04-01), 国家自然科学基金重大项目 (49890330) 和中国科学院禹城综合试验站开放基金共同资助

收稿日期: 2000-08-03 改回日期: 2000-08-26

在冠层表面能量平衡与 Penman-Monteith 公式的基础上给出了冠层温度-气温差 $T_c - T_a$ 的理论公式:

$$T_c - T_a = \frac{r_a}{\rho C_p} \frac{\gamma(R_n - G) \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right) - \rho C_p \frac{e_s(T_a) - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (2)$$

式中, Δ 为饱和水汽压差温度曲线的斜率, R_n 为冠层顶部的净辐射强度, G 为地表热通量强度, ρ 为空气密度, C_p 为空气定压比热容量, e_s 为空气饱和水汽压函数, e_a 为空气实际水汽压, γ 为湿度计常数, r_c 为冠层阻力, r_a 为冠层动量汇集到参考高度的空气动力学阻力。冠层温度-气温差上限定义为作物腾发量为 0 时的冠层温度-气温差, 即当 $r_c \rightarrow \infty$ 时:

$$T_{c\infty} - T_a = \frac{r_a}{\rho C_p} (R_n - G) \quad (3)$$

冠层温度-气温差下限定义为当作物腾发不受水分胁迫时的冠层温度-气温差, 此时的冠层阻力为某一最小值 r_s , 即:

$$T_{cl} - T_a = \frac{r_a}{\rho C_p} \frac{\gamma(R_n - G) \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right) - \rho C_p \frac{e_s(T_a) - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (4)$$

将式(2)~(4)代入式(1)得到作物水分胁迫指数理论公式。采用 Dickinson R. D. 公式^[3]确定冠层阻力:

$$r_c = r_s \frac{F_1(PAR)}{F_2(\theta)F_3(VPD)F_4(T_a)} \quad (5)$$

式中, F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 分别为光合有效辐射、土壤水分、空气饱和水汽压差和气孔温度对冠层阻力的影响函数, PAR 为光合有效辐射强度, θ 为土壤含水量, VPD 为空气饱和水汽压差, T_a 为空气温度。关于 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 的具体表达式可参阅文献[5]。 r_s 为最小冠层阻力, 由下式确定:

$$r_s = \frac{r_{\min}}{LAI} \quad (6)$$

式中, r_{\min} 为叶片的最小阻力, 一般取为 100s/m, LAI 为叶面积指数。通过观测土壤水分含量、作物叶面积指数、株高、空气温度与湿度、风速、净辐射和光合有效辐射以及地表热通量, 利用式(1)~(6)可确定作物水分胁迫指数。实际利用作物水分胁迫指数作为确定灌水时间的指标时, 要预先通过田间试验建立作物水分胁迫指数与作物叶水势(或产量、或土壤含水量)的关系来确定作物不受水分胁迫, 受轻度水分胁迫, 直至严重水分胁迫对应的作物水分胁迫指数阈值。作物水分胁迫指数中包含了土壤水分胁迫对作物的影响, 作物水分胁迫指数与土壤含水量的解析关系是复杂的。定义无量纲变量 RAW 来表示土壤相对有效含水量, 并建立其与作物水分胁迫指数的相关关系:

$$RAW = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_f - \theta_r} \quad (7)$$

式中, θ 为土壤体积含水量, θ_f 为土壤田间持水量, θ_r 为土壤残余含水量。

2 结果与分析

2.1 冠层阻力(r_c)模型校验及作物水分胁迫指数理论公式有效性检验

利用波文比方法计算腾发量。利用波文比方法计算腾发量校验冠层阻力模型时, 采用冬小麦不同生育期的天气晴朗时 8:00~18:00 的观测数据, 且叶面积指数 > 2.7 , 以满足 Penman-Monteith 公式所作假定的要求。通过调整冠层阻力公式中的经验常数使计算的腾发量与波文比计算值较好地吻合, 将此时的冠层阻力公式作为适于本地区情况的冠层阻力公式。图 1 是用波文比法和 Penman-Monteith 公式计算的腾发量对比, 二者总体吻合较好。利用

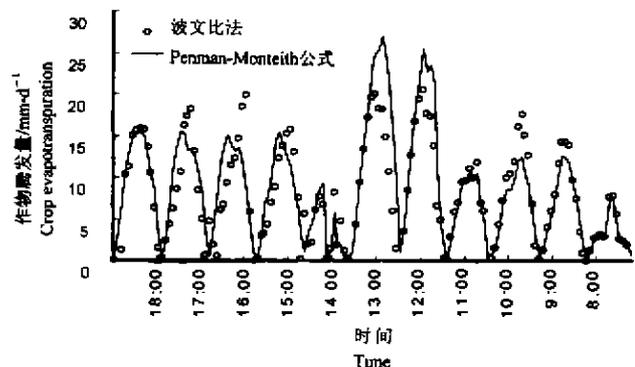


图 1 用波文比方法和 Penman-Monteith 公式计算的腾发量对比

Fig. 1 Comparison between the evapotranspirations estimated with the Bowen ratio approach and with Penman-monteith formula

得到的冠层阻力公式和作物水分胁迫指数理论公式计算中午 12:00 的作物水分胁迫指数;同时利用红外温度计测得冠层温度并直接计算作物水分胁迫指数;二者吻合很好,说明本研究校验的冠层阻力公式和作物水分胁迫指数理论公式是可靠的。

2.2 不同灌水处理作物水分胁迫指数模拟计算

利用气象场观测资料和冬小麦小区试验观测资料,采用作物水分胁迫指数理论公式计算了部分小区 3 月 20 日~5 月 15 日每天中午 12:00 的作物水分胁迫指数值。此间,小区作物叶面积指数均>2.7。图 2~3 分别给出了 1m 土层储水量≥60%田间持水量处理和不灌水不降水处理各 1 个小区的作物水分胁迫指数值的变化状况,前者代表冬小麦基本不受土壤水分胁迫,而后者则代表作物遭受较严重的土壤水分胁迫情形。由图 2 可知作物水分胁迫指数随作物根系层土壤水分的变化趋势为当储水量在田间持水量水平时,作物水分胁迫指数基本为 0;随作物蒸腾耗水的进行,土壤含水量越来越低,作物水分胁迫指数渐呈上升趋势。图 3 也表现出这一变化趋势,由图 3 可知,土壤有效储水量随作物蒸腾耗水而平缓降低,且后期降低速度趋缓,这与土壤水分消退规律研究的结论一致。但作物水分胁迫指数在随土壤供水能力降低而增大的过程中却表现出明显的波动性,这种波动性由气象因子的强烈波动性所引起。

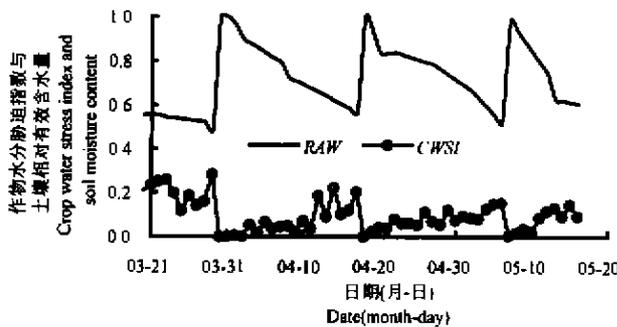


图 2 实测土壤含水量与计算的作物水分胁迫指数随时间变化过程(≥60%田间持水量处理)
Fig. 2 The changes of the measured soil moisture content and the calculated CWSI with time
(The treatment of keeping the soil water storage in 100cm always higher than 60% of the field capacity)

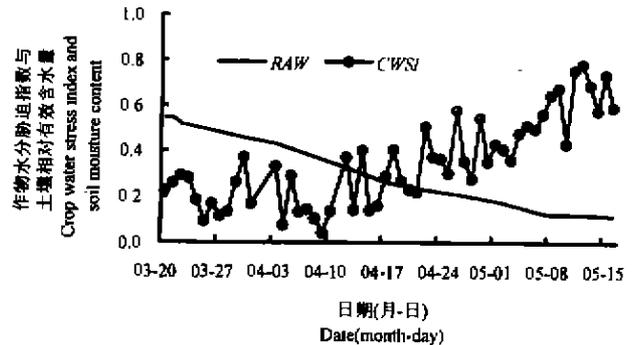


图 3 实测土壤含水量与计算的作物水分胁迫指数随时间变化过程(不灌水不降雨处理)
Fig. 3 The changes of the measured soil moisture content and the calculated CWSI with time
(The treatment of no irrigation and sheltered rainfall)

2.3 土壤相对有效含水量与作物水分胁迫指数相关关系

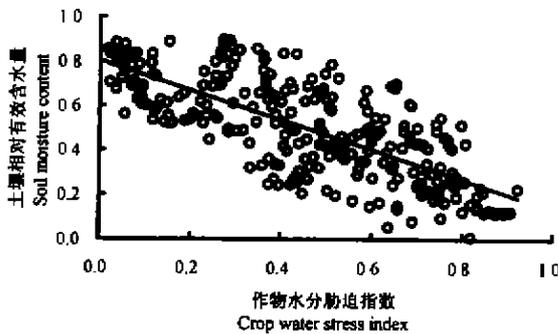


图 4 作物水分胁迫指数与土壤相对有效含水量相关性分析
Fig. 4 Correlation relation of the CWSI to the soil moisture content

作物水分胁迫指数与土壤相对有效含水量间相关关系见图 4,由图 4 可知,随土壤含水量的降低,作物水分胁迫指数值升高的趋势明显,二者相关关系为:

$$RAW = 0.80 - 0.67CWSI \quad (8)$$

其相关系数为 0.74,变异系数为 0.52,说明数据离散,相关性较差,这预示着直接利用作物水分胁迫指数来指导作物灌水量可靠性较差。

3 小结

作物水分胁迫指数受土壤水分与气象双重影响而波动较大;相关分析结果表明,当土壤相对有效含水量 ≥0.80 时作物不受土壤水分胁迫,这与通常认为土壤

相对有效含水量>0.75~0.80 时作物完全不受土壤水分胁迫结论基本一致;通过作物水分胁迫指数来确定灌水时间与灌水量,尚需进一步研究如何去除作物水分胁迫指数中气象因子造成的波动性影响,或者将作物水分胁迫指数和其他方法结合来实现灌水时间和灌水量的双重标识。

参 考 文 献

- 1 Idso S. B., et al. Normalizing the stress degree day for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 1981,24:45~55
- 2 Jackson R. D., et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 1981,17:1133~1138
- 3 Dickinson R. E. Modelling evapotranspiration for three dimensional global climate models. *Climate Processes and Climate Sensitivity. Geophys. Monogr.*, 1984,29:58~72